气候变化和人类活动对毛乌素沙地NDVI变化的量化分析

常文静[1]， 丛士翔[1]， 王融融[1]， 丁旭东[1]， 余海龙[1]， 黄菊莹[2]
（1. 宁夏大学地理科学与规划学院，宁夏 银川 750021；2. 宁夏大学生态环境学院，宁夏 银川 750021）

摘　要：气候变化和人类活动是驱动植被动态变化的两大关键影响因子。归一化植被指数（NDVI）是评估植被动态变化的有效指标，能够合理地评价生态系统变化及其可持续性。基于SPOT/VEGETATION NDVI时间序列数据、气象数据和地表覆盖数据，借助GIS空间分析、相关性分析及残差分析等方法，探讨了1998—2019年毛乌素沙地NDVI时空演变特征及其驱动机制，厘定了气候变化和人类活动两大驱动因素对毛乌素沙地NDVI变化的相对贡献率。结果表明：（1）1998—2019年毛乌素沙地NDVI整体以$0.0067\cdot a^{-1}$的速率增长，空间分布上表现为由西北向东南逐渐递增的分布趋势。但NDVI增长整体持续性不强，未来可能出现波动。（2）气候变化与人类活动共同驱动了毛乌素沙地NDVI的增长。其中，NDVI变化与降水呈显著正相关，而与气温的相关性则较弱。大型生态工程的实施与气候要素的耦合驱动了毛乌素沙地86.30%的植被改善，和已有生态建设工程成效研究结论相符。（3）归因分析结果表明，人类活动促进了毛乌素沙地83.20%的NDVI增长，而降水量驱动了毛乌素沙地73.14%的NDVI增长，降水量与人类活动的耦合作用对NDVI的影响更为显著。

关 键 词：毛乌素沙地；植被NDVI；气候变化；人类活动；相对贡献率
文章编号：1000－6060(2025)01－0063－12(0063～0074)

毛乌素沙地是中国北方防沙带的关键地带，位于东北-华北暖干趋势带和西北-青藏高原暖湿趋势带的过渡地带[1]。20世纪中期以来，由于过度放牧、樵采等一些人为的干扰活动，当地出现了土地退化、荒漠化等问题[2]。近年来气候变化和极端天气事件的加剧使土地退化和荒漠化问题更加严重，降低了生态系统服务功能和生物多样性，严重影响着自然环境、农业活动和区域经济发展[3]。随着毛乌素沙地植被退化、土地沙化问题严峻，草地生产力出现下降，草畜矛盾也日渐突出。中国自2000年前后逐步启动和落实了一系列生态工程如退牧还草、退耕还林工程等和草原生态奖补政策，以期减少天然草地载畜量并促进植被恢复和增加植被覆盖度，有效遏制土壤风蚀的危害[4]。监测植被的动态变化及其发展趋势，不仅可以准确、及时、全面地掌握荒漠化土地的消长变化信息，还可以监测和预测生态工程的效果。

由于植被具有显著的年际变化和季节变化的特点，在陆地-大气的交互影响下，植被在一定的程度上能代表地表土地覆盖的变化，是全球变化的"指示器"[5]，因此，在一定程度上监测植被的动态变化反映了气候变化的趋势。常用的反映植被动态变化的监测指标有归一化植被指数（NDVI）[6]、植物净初级生产力（NPP）[7]、植被覆盖度（VFC）[8]、叶面积指数（LAI）[9]等。其中，NDVI能很好地表征植被覆盖和生长状况，被广泛用作植被地上生产力的替

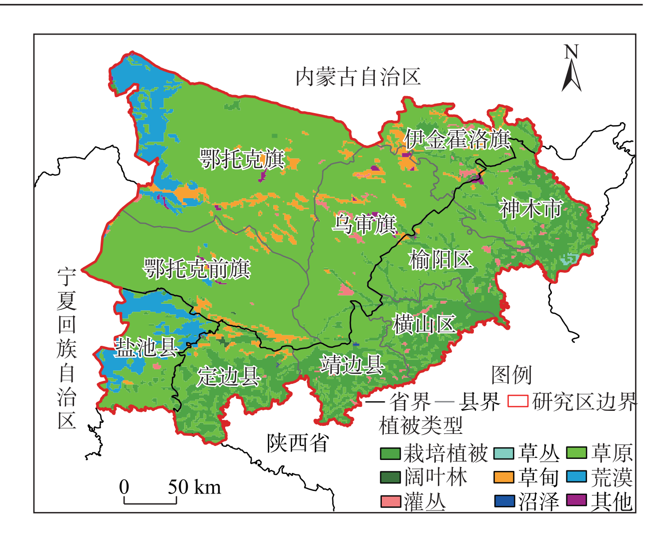
收稿日期：2024-01-05； **修订日期**：2024-02-22
基金项目：国家自然科学基金项目（41961001）资助
作者简介：常文静（2000-），女，硕士研究生，主要从事全球变化生态学研究. E-mail: Cwj15695019609@163.com
通讯作者：余海龙（1979-），男，博士，教授，主要从事土壤地理及节水灌溉方面的研究. E-mail: yhl@nxu.edu.cn

代指标。因其具有覆盖范围广、监测灵敏度高、噪音小、数据来源广等特点，被视作是反映植被动态变化准确性最高的指标[10]。气候变化和人类活动是驱动植被动态变化的两大主要因子[11]。退耕还林和退牧还草工程的实施使毛乌素沙地的NDVI得到显著改善，人类活动成为影响毛乌素沙地NDVI变化的主要因素[12]，而中国西北地区"暖湿化"气候格局的东扩[13]促进了毛乌素沙地一系列生态工程成效的提升和植被的恢复[14]。人类活动同样可以决定特定区域内的植被动态变化[15-16]。如何区分人类活动和气候变化对生态工程成效的贡献率，不仅对生态工程成效的监测与评估有重要意义，还可有助于进一步厘清碳源/汇变化机制[17]。因此，本研究基于NDVI，以1998年作为生态恢复工程实施前的基准年，借助遥感影像分析实施生态工程前后毛乌素沙地植被NDVI时空分布，并根据1998—2019年气温、降水等气象数据分析植被对气候变化的响应，通过趋势分析和残差分析法分析植被变化趋势及相对贡献率，旨在厘清毛乌素沙地气候变化和人类活动对植被生长的驱动机制，为评价生态工程的修复实施效果及制定生态环境系统恢复建设措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

毛乌素沙地(37°27.5′~39°22.5′N，107°20′~111°30′E)是中国四大沙地之一，位于中国北方农牧交错带的中部，地处鄂尔多斯高原与黄土高原的过渡地带[18]，是中国北方重要的生态屏障区，整体呈自西北向东南倾斜趋势[19]，海拔255~1948 m，面积约为4.22×10^4 km^2。该区域属于荒漠草原-干草原-森林草原的过渡带[19]，具有明显的生态脆弱性和空间异质性[20]。气候特征为典型的大陆季风气候[18]，年均气温6.5~10.3 ℃，东南高于西北[20]，年均降水量150~500 mm，空间分布上呈自东南向西北递减趋势[21]。参照1:1000000中国植被图集可将当地植被类型分为9类(图1)，分别为：草丛、栽培植被、沼泽、灌丛、阔叶林、草原、草甸、荒漠和其他。其中，毛乌素沙地南部和东南部地貌以黄土丘陵地形为主，气候条件复杂多样，植被以阔叶林为主，植被生长状况明显好于毛乌素沙地其他区域；中部和东部属于



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2022)1873号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 毛乌素沙地植被类型分布

Fig. 1 Distribution of vegetation types in Mu Us Sandy Land

干草原，北部边缘属于荒漠草原，分布着灌丛和栽培植被，降水稀少严重影响着区域植被的生长状况。

1.2 数据来源

遥感数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)SPOT VEGETATION数字影像，该数据的空间分辨率为1 km。采用最大合成法生成年度NDVI[22]，以消除气溶胶、云、阴影、太阳高度角等对SPOT数据的干扰。

气象数据来源于国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn)中的毛乌素沙地及周围的10个气象台站，其时间分辨率为1 d[19]。为保证毛乌素沙地气象数据的完整性[23]，使用ArcGIS的空间分析模块对气象数据进行克里金插值获取缺测站点的气象数据，进而获取与NDVI数据相同的降水和气温的栅格数据[24]。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析法 线性回归法被大量用于分析植被覆盖的空间变化趋势[25]。采用一元线性回归公式，逐像元拟合近n年间遥感影像NDVI的斜率(S)，得到n年NDVI的像元空间变化趋势，计算公式如下：

$$S=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times N_i)-\sum_{i=1}^{n}i\times\sum_{i=1}^{n}N_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{1}$$

式中：N_i为第i年的年均NDVI；n为研究时段长度，n=22。

使用F检验进行显著性检验。计算公式如下：

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\widehat{y_i} - \bar{y}\right)^2}{\sum\left(y_i - \widehat{y_i}\right)^2 \Big/ (n-2)} \tag{2}$$

式中：$\widehat{y_i}$为第i年的NDVI的线性回归值；y_i为第i年的NDVI；$\bar{y}$为研究期内NDVI的平均值；$n-2$为残差自由度。将线性回归与F检验的结果相结合，分为：极显著减少（$S<0, P<0.01$）、显著减少（$S<0, 0.01<P<0.05$）、不显著降低（$S<0, P>0.05$）、极显著增加（$S>0, P<0.01$）、显著增加（$S>0, 0.01<P<0.05$）、不显著增加（$S>0, P>0.05$）[26]。

NDVI的变化幅度（E）代表了NDVI随时间的变化方向，当$E>0$时，表示植被NDVI为增加趋势，数值越大增加越快；反之则为减少[25]。计算公式如下：

$$E = S(n-1) \tag{3}$$

1.3.2 Hurst指数 Hurst指数是定量描述时间序列长期依赖性的有效方法[27]。其计算公式如下：

$$\overline{N(t)} = \frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t} N_i,\ \ t = 1, 2, \cdots, n \tag{4}$$

$$X(m) = \sum_{i=1}^{t}\left(\Delta N_i - \Delta\overline{N(t)}\right),\ \ 1 \leqslant m \leqslant t \tag{5}$$

$$R(t) = \max_{1 \leqslant t \leqslant n} X(m) - \min_{1 \leqslant t \leqslant n} X(m),\ \ t = 1, 2, \cdots, n \tag{6}$$

$$S(t) = \left[\frac{1}{t}\sum_{i=1}^{t}\left(\Delta N_i - \Delta\overline{N(t)}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}},\ \ t = 1, 2, \cdots, n \tag{7}$$

式中：时间序列N_i为第i年的年均NDVI，对于任意正整数t（$t \in (0, \infty]$）定义该时间序列的均值序列为$\overline{N(t)}$，累计离差为$X(m)$，极差为$R(t)$，标准差为$S(t)$；ΔN_i和$\Delta\overline{N(t)}$为差分序列，即$\Delta N_i = N_i - N_{i-1}$，$\Delta\overline{N(t)} = \Delta\overline{N(t)} - \Delta\overline{N(t-1)}$。若存在，$R/S \propto t^H$，则说明时间序列$N_i$存在Hurst现象。$H$为Hurst指数，当$H<0.5$时，表明时间序列具有反持续性，当$0.5<H<1$时，表明时间序列具有持续性[27]。

1.3.3 偏相关分析 偏相关分析是在剔除其他变量影响的情况下，分析其他两要素间的相关性。本研究利用偏相关分析来分析毛乌素沙地NDVI与气温和降水之间的关系。计算公式如下：

$$r_{xyz} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{\left(1 - r_{xz}^2\right)\left(1 - r_{yz}^2\right)}} \tag{8}$$

式中：r_{xyz}为控制z时，x与y之间的偏相关系数；r_{xy}、r_{xz}、r_{yz}分别为x与y、x与z、y与z之间的线性相关系数。选取t检验进行显著性检验，根据结果分为：不显著正相关（$r>0, P>0.05$）、不显著负相关（$r<0, P>0.05$）、显著正相关（$r>0, P<0.05$）和显著负相关（$r<0, P<0.05$）。

1.3.4 多元回归残差分析 残差趋势分析法是定量区分人类活动与气候变化在植被变化中相对贡献率的最具代表性的方法，可有效厘清气候变化和人类活动的相对贡献，且适合长时序分析[28]。该方法假设植被生长是由气候变化决定，首先根据普通最小二乘回归（OLS）建立年NDVI最大值（$NDVI_{max}$）与气候因子之间的关系，方程残差则被认为是人类活动引起的生态系统生产力的变化。残差为正表明人为因素（如生态工程项目）驱动植被改善，而残差为负则表明人类活动导致植被退化。其具体计算公式如下：

$$N_{CC} = a \times T + b \times P + c \tag{9}$$

$$N_{HA} = N_{obs} - N_{CC} \tag{10}$$

式中：N_{CC}、N_{obs}、N_{HA}分别为NDVI的预测值、观测值、残差值；a、b和c分别对应多元回归模型中年均温、年降水和常数项的回归系数；T为年均气温（℃）；P为年降水量（mm）[29]。

1.3.5 植被NDVI变化驱动因素厘定及相对贡献率分析 为了更好地衡量气候变化和人类活动对NDVI的影响，基于气候变化和人类活动影响的变化趋势将这2种因素及其共同作用分为3个等级[30]，即促进（>0.0005）、基本无影响（−0.0005~0.0005）和抑制（<−0.0005）。此外，在区分植被NDVI驱动因素的基础上通过残差分析方法计算各驱动因素对NDVI变化的相对贡献率（表1）。

2 结果与分析

2.1 毛乌素沙地NDVI时空变化特征与趋势分析

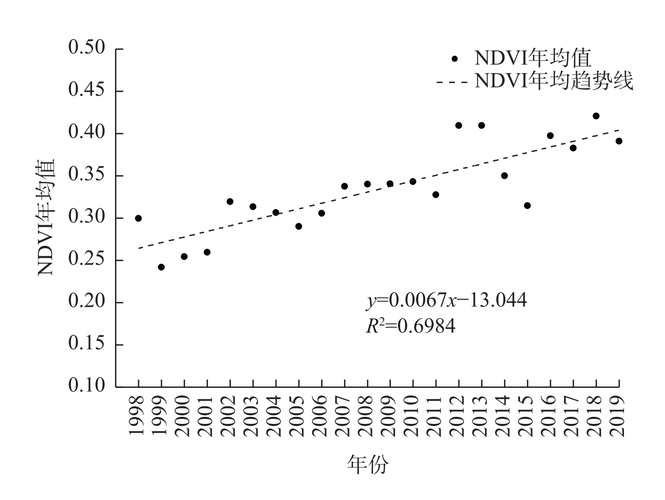
1998—2019年毛乌素沙地NDVI总体呈增长趋势，年均NDVI从0.2417增加至0.3909，并伴有年际波动。经过F检验，NDVI呈极显著上升趋势，以1998年为评价基准年则表现为1999、2000、2001、2005、2006、2011、2014、2015、2017年和2019年毛乌素沙地植被生长状况相对较差，其中以1999年为最差；1998、2002、2003、2007—2011、2012、2013、2016年和2018年植被生长状况相对较好，其中以2018年最好。年际变化趋势分析结果表明，毛乌素沙地NDVI趋于好转，以$0.0067 \cdot a^{-1}$的速率显著增加（图2）。

表1 气候变化与人类活动对毛乌素沙地植被NDVI驱动因素判定及贡献率计算方法

Tab. 1 Determination of the driving factors of climate change and human activities on NDVI vegetation in Mu Us Sandy Land and the calculation method of contribution rate

$S(N_{obs})$	驱动因素	驱动因素的划分标准		驱动因素的贡献率/%	
		$S(N_{CC})$	$S(N_{HA})$	气候变化	人类活动
>0	CC&HA	>0	>0	$\frac{S(N_{CC})}{S(N_{obs})}$	$\frac{S(N_{HA})}{S(N_{obs})}$
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	CC&HA	<0	<0	$\frac{S(N_{CC})}{S(N_{obs})}$	$\frac{S(N_{HA})}{S(N_{obs})}$
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

注:CC为气候变化;HA为人类活动;$S(N_{CC})$为气候变化影响变化趋势;$S(N_{HA})$为人类活动影响变化趋势;$S(N_{obs})$为实际的归一化植被指数(NDVI)变化趋势。下同。



注:NDVI为归一化植被指数。下同。

图2 1998—2019年毛乌素沙地NDVI均值年际变化趋势

Fig. 2 Interannual change trend of average NDVI in Mu Us Sandy Land from 1998 to 2019

从毛乌素沙地NDVI时空分布图(图3)可知,毛乌素沙地NDVI总体上呈增加趋势。但由于毛乌素沙地不同位置的水热条件和植被类型的不同,NDVI空间分异显著,空间上表现为由西北向东南逐渐升高。NDVI高值区集中分布于毛乌素沙地南部(靖边县、定边县、神木市和横山区),低值区分布在毛乌素沙地中部和西北部(鄂托克旗、乌审旗和鄂托克前旗)。从NDVI变化趋势类型的空间分布(图4)可以看出,NDVI呈增加趋势的区域面积占比为95.25%,主要分布在毛乌素沙地的东部;呈减少趋势的区域面积占比相对较小,为4.75%,并且以不显著减少趋势为主,主要分布毛乌素沙地西北部;植被退化严重的区域最小且分散,占0.86%,呈散点状分布于榆阳区中部、鄂托克旗西北部、鄂托克前旗中部神木市西部与靖边县中部。

从植被类型的角度来看,不同植被类型的平均NDVI之间存在较大差异,具体表现为草丛(0.461)>栽培植被(0.433)>沼泽(0.427)>灌丛(0.383)>阔叶林(0.357)>草原(0.315)>草甸(0.311)>其他(0.285)>荒漠(0.243)。从各类植被NDVI的面积占比变化统计结果(表2)可以看出,草原的NDVI增加的面积最显著,面积占比为43.88%,其次为栽培植被(16.38%)。这主要和毛乌素沙地近年来实施的大型生态工程有关。

从表3可以看出,Hurst指数>0.5和<0.5的面积占比分别为30.09%和63.99%,说明NDVI变化的反向持续性强于持续性。从Hurst指数的空间分布比例来看(图5),呈潜在退化趋势区域面积大于持续

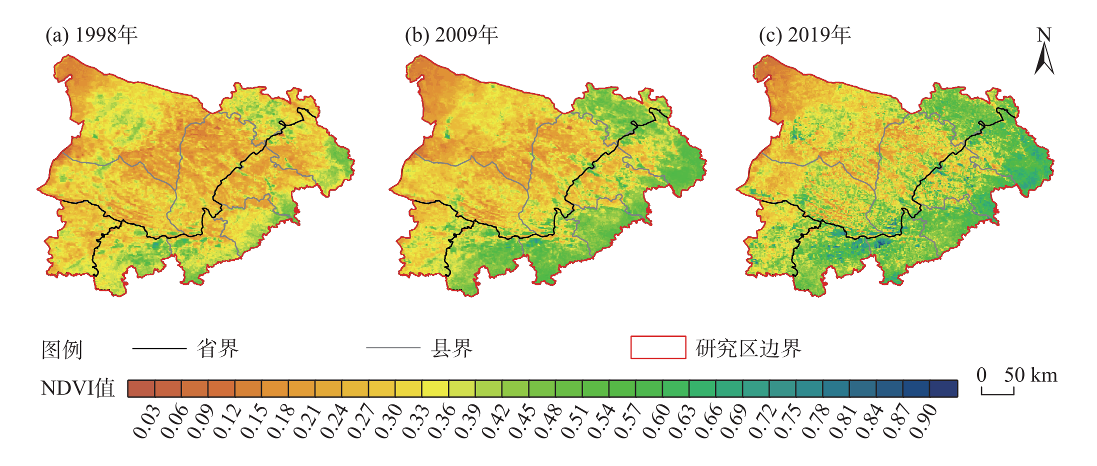


图3 1998、2009年和2019年毛乌素沙地NDVI空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of NDVI in Mu Us Sandy Land in 1998, 2009 and 2019

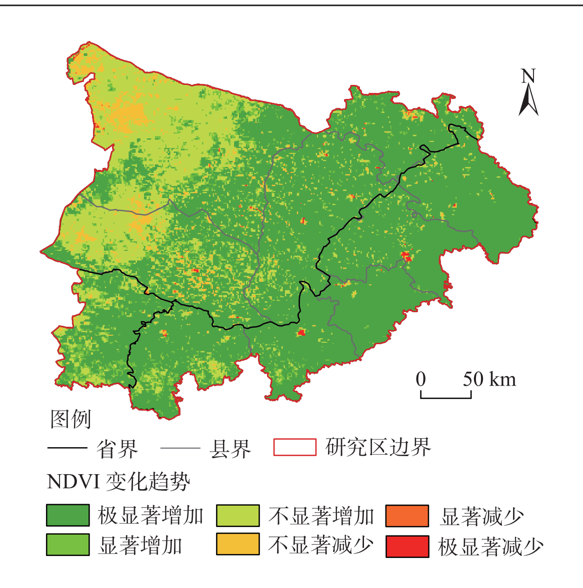


图4　1998—2019年毛乌素沙地NDVI变化趋势的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of NDVI change trends in Mu Us Sandy Land from 1998 to 2019

表2　毛乌素沙地各植被类型NDVI变化的面积占比

Tab. 2　Area proportions of NDVI changes of each vegetation type in Mu Us Sandy Land

植被类型	NDVI变化的面积占比/%					
	极显著增加	显著增加	不显著增加	极显著减少	显著减少	不显著减少
栽培植被	16.38	0.94	0.96	0.16	0.02	0.13
阔叶林	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
灌丛	1.19	0.03	0.06	0.01	0.01	0.03
荒漠	2.10	0.58	2.80	0.05	0.02	0.87
草原	43.88	5.31	16.37	0.26	0.07	2.69
草丛	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
草甸	3.20	0.38	0.57	0.02	0.01	0.12
沼泽	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
其他	0.34	0.07	0.12	0.01	0.01	0.04

表3　毛乌素沙地NDVI变化趋势持续性区域的面积占比

Tab. 3　Area proportions of persistence regions of NDVI change trends in Mu Us Sandy Land

NDVI变化幅度(E)	Hurst指数(H)	NDVI变化	像元数/个	面积占比/%
E>0	H>0.5	持续改善	24209	30.09
E>0	H<0.5	反持续改善	51472	63.99
E<0	H>0.5	持续退化	949	1.18
E<0	H<0.5	反持续退化	3813	4.74

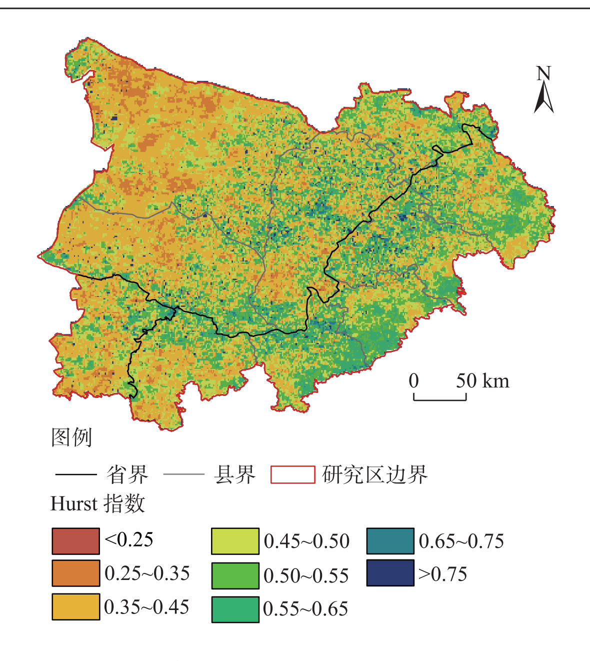


图5　毛乌素沙地NDVI Hurst指数的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of NDVI Hurst index in Mu Us Sand Land

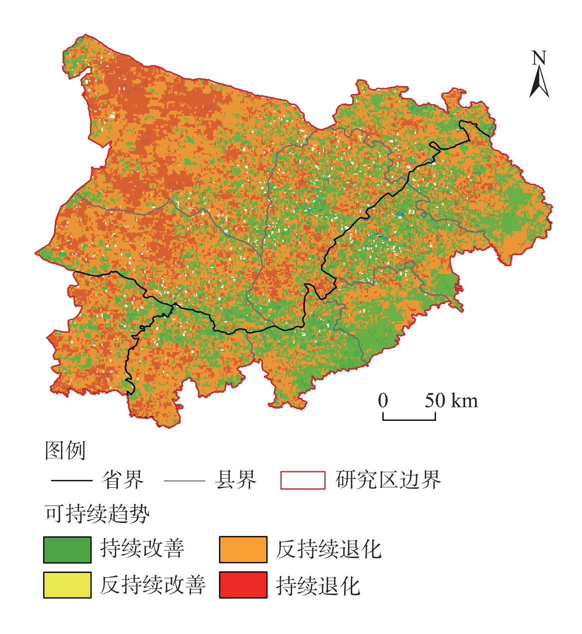


图6　毛乌素沙地NDVI变化趋势持续性区域的空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of persistence regions of NDVI change trends in Mu Us Sand Land

改善区域面积。通过ArcGIS将NDVI变化幅度与Hurst指数耦合叠加可分析变化趋势的可持续性与否[25]。NDVI变化幅度与Hurst指数分级[31]的叠加统计结果(图6、表3)，63.99%的区域其NDVI变化幅度呈增加趋势而Hurst指数<0.5，说明该区域NDVI虽然呈增加趋势，但与过去变化趋势相反，即NDVI未来变化趋势与过去并无相关性；30.09%的区域其NDVI变化幅度呈增加趋势而Hurst指数>0.5，说明该区域NDVI呈持续改善趋势；而呈持续退化和反持续退化的面积占比分别为1.18%和4.74%。毛乌

素沙地呈弱、较弱持续性的面积占比达90.9%，说明毛乌素沙地的NDVI整体上呈较弱持续改善趋势。

2.2 毛乌素沙地NDVI变化驱动机制分析

毛乌素沙地NDVI整体上与降水呈正相关而与气温呈负相关($P<0.05$)(图7a、表4)。其中，与降水呈显著正相关的区域主要集中分布在神木市、榆阳区、横山区、靖边县和伊金霍洛旗等地区，面积占比为73.14%。与降水呈显著负相关的区域呈零星状分布在榆阳区中南部、横山区北部、乌审旗东部和鄂托克旗北部，面积占比为0.61%。

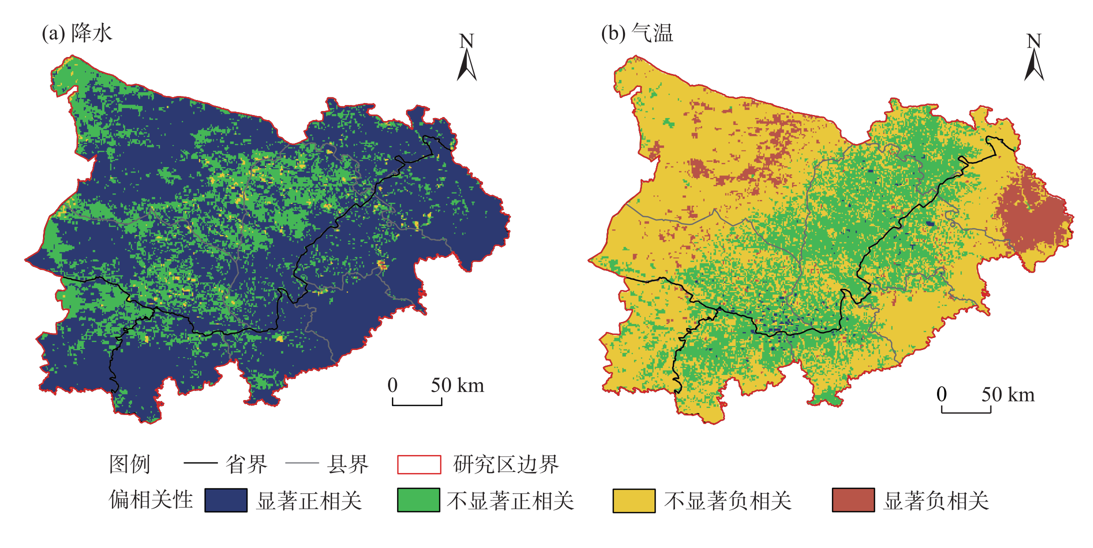


图7 毛乌素沙地NDVI与降水和气温偏相关性区域的空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of partial correlation regions of NDVI with precipitation and temperature in Mu Us Sandy Land

表4 毛乌素沙地NDVI与降水和气温的偏相关性区域的面积占比

Tab. 4 Area proportion of partial correlation regions of NDVI with precipitation and temperature in Mu Us Sandy Land

偏相关系数	降水		气温	
	像元数/个	面积占比/%	像元数/个	面积占比/%
显著正相关	58836	73.14	577	0.72
不显著正相关	19888	24.72	32106	39.91
显著负相关	494	0.61	6187	7.69
不显著负相关	1225	1.52	41573	51.68

整体上，毛乌素沙地NDVI与气温呈不显著负相关(图7b、表4)。其中，与气温呈显著正相关的区域以点状分布在毛乌素沙地的中部，零星分布于定边县和靖边县的北部、鄂托克前旗的南部、乌审旗的南部和中部以及榆阳区的西部，面积占比仅为0.72%。而与气温呈显著负相关的区域主要分布在神木市的东部，面积占比为7.69%。

通过残差趋势分析得到气候和人类活动对毛乌素沙地NDVI的贡献率和作用范围。气候变化对NDVI的增加起促进作用的面积占比为93.12%；人类活动对NDVI的增加起促进作用的面积占比为83.20%，主要分布在伊金霍洛旗、神木市、榆阳区、横山区、乌审旗、靖边县、定边县和盐池县等。这些地区由于生态工程的实施及生态保护政策的落实促进了植被的生长发育。人类活动对NDVI起抑制作用所占的面积比例仅为9.53%，主要分布于在鄂托克旗的西部(图8b、表5)。参照毛乌素沙区沙漠化土地防治区划[32]，由于鄂托克旗兼具矿产开采、农牧业发展与沙化草原生态建设功能，部分区域如棋盘井矿区，因此地天然气、石油、煤、黏土等资源富集，区域肩负煤炭开采、建材加工等功能，强烈的人类开发活动导致了沙漠化的产生，对NDVI产生抑制作用。而荒漠草原和沙化草原部分则因生态建设(如蒙西地区的光伏加生态修复)使其NDVI呈增加趋势。

如图9、表6所示，由气候变化和人类活动共同驱动了毛乌素沙地86.3%面积NDVI的增加，而由气候变化和人类活动共同负向驱动NDVI减少的面积占比仅为0.31%；仅由气候变化正向驱动NDVI增加的面积占比为10.82%，主要分布于鄂托克旗和鄂托克前旗西部地区；仅由人类活动驱动的生长季ND-

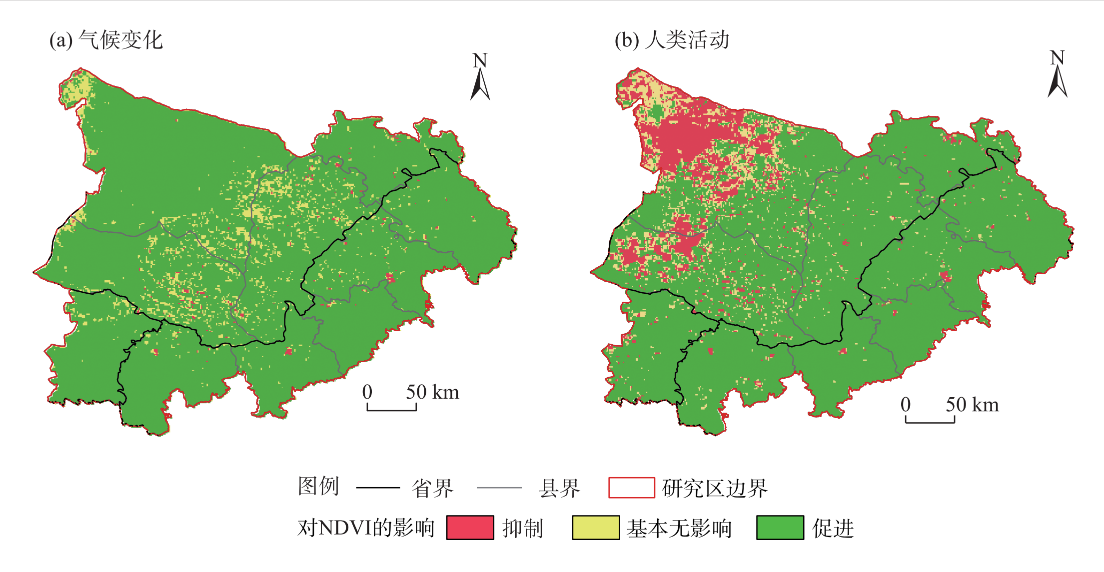


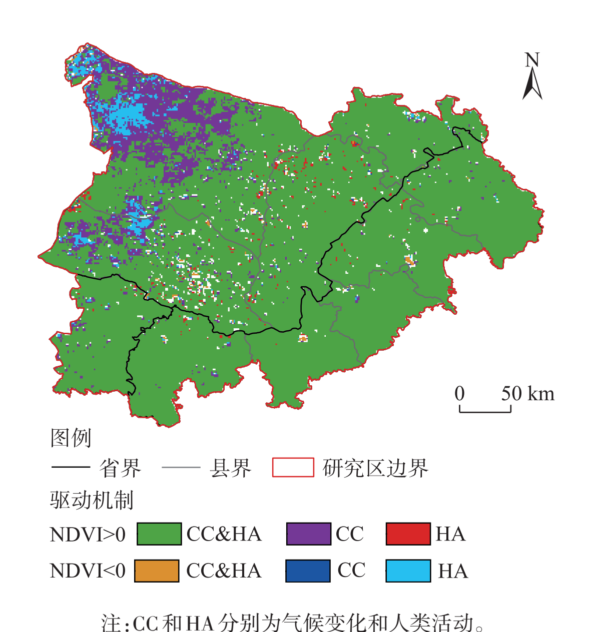
图8 气候变化与人类活动对毛乌素沙地NDVI变化影响区域的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of NDVI change regions effected by climate changes and human activities in Mu Us Sandy Land

表5 气候变化与人类活动对毛乌素沙地NDVI变化影响区域的面积占比

Tab. 5 Area proportions of NDVI change regions effected by climate changes and human activities in Mu Us Sandy Land

趋势值	对NDVI的影响	气候变化		人类活动	
		像元数/个	面积占比/%	像元数/个	面积占比/%
<-0.0005	抑制	452	0.56	7621	9.53
-0.0005~0.0005	基本无影响	5084	6.32	5818	7.27
>0.0005	促进	74907	93.12	66561	83.20



注：CC和HA分别为气候变化和人类活动。

图9 毛乌素沙地NDVI变化驱动因素的空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of driving factors of NDVI changes in Mu Us Sandy Land

表6 毛乌素沙地NDVI变化驱动因素的面积占比

Tab. 6 Area proportions of driving factors of NDVI changes in Mu Us Sandy Land

NDVI趋势	驱动力	像元数/个	面积占比/%
>0	CC&HA	49895	86.30
	CC	5792	10.02
	HA	467	0.81
<0	CC&HA	180	0.31
	CC	59	0.10
	HA	1425	2.46

VI增加的面积占比为0.81%，点状分布于毛乌素沙地的中部地区。仅由气候变化负向驱动NDVI减小的面积占比为0.10%，分布较分散；仅由人类活动负向驱动NDVI减小的面积占比为2.46%，主要分布于鄂托克旗与鄂托克前旗。总体上，气候变化和人类活动共同主导驱动了毛乌素沙地植被的整体改善。

2.3 不同驱动因素对植被NDVI变化的相对贡献

利用残差分析可以区分气候变化和人类活动对NDVI变化的相对贡献[29]。如图10a所示，气候变化对毛乌素沙地NDVI变化的贡献率为正的面积占比为94.38%(图10a、表7)。其中，气候变化的贡献率在20%~60%的区域面积较大，面积占比为53.39%；贡献率≥80%的面积占16.75%，主要分布在鄂托克旗与鄂托克前旗的西部。气候变化对毛乌素沙地NDVI变化的贡献率为负的面积占比为5.62%，主要集中在鄂托克旗和鄂托克前旗的西北部。

根据图10b所示，人类活动对毛乌素沙地NDVI

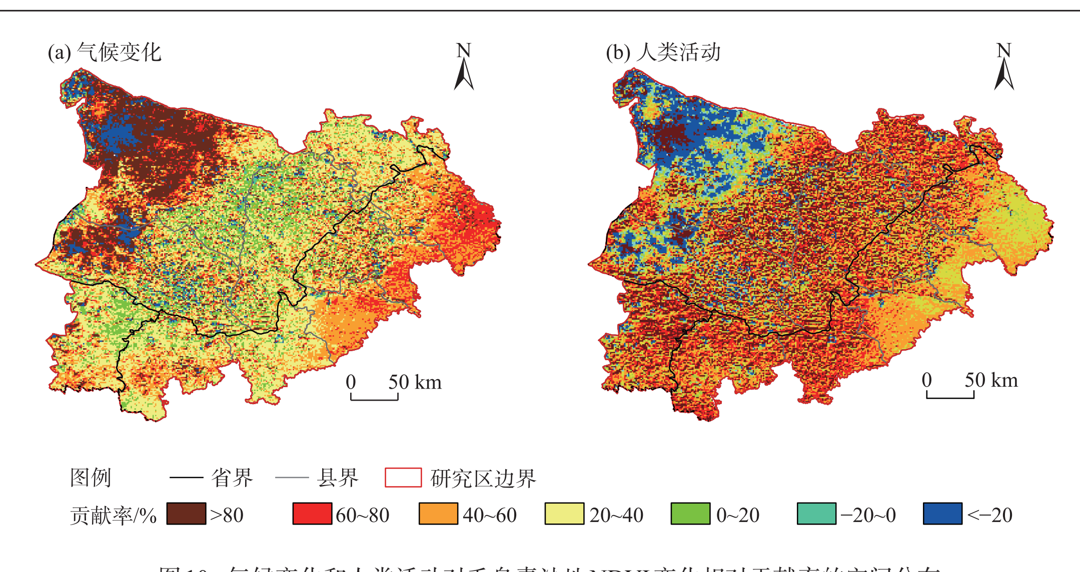


图10 气候变化和人类活动对毛乌素沙地NDVI变化相对贡献率的空间分布

Fig. 10 Spatial distributions of the relative contribution rate of climate changes and human activities on NDVI changes in Mu Us Sandy Land

表7 气候变化及人类活动对毛乌素沙地NDVI变化相对贡献率的面积占比

Tab. 7 Area proportions of the relative contribution rates of climate changes and human activities to NDVI changes in Mu Us Sandy Land

贡献率/%	气候变化		人类活动	
	像元数/个	面积占比/%	像元数/个	面积占比/%
<−20	2290	3.86	5080	8.61
−20~0	1040	1.76	1946	3.30
0~20	7652	12.91	3552	6.02
20~40	18546	31.30	8929	15.14
40~60	13088	22.09	13756	23.32
60~80	6714	11.33	11119	18.85

变化的贡献率为正的区域面积约占88.09%(图10b、表7)。在这些区域中,贡献率在40%~60%和≥80%的区域面积较大,并且占总面积的48.08%。贡献率≥80%的区域主要以密集的点状分布于毛乌素沙地大部分区域。贡献率为负的面积占比为11.91%,其空间分布与气候变化相似,范围相对更小。

根据气候变化和人类活动对毛乌素沙地NDVI变化的相对贡献率比较结果可知,人类活动的相对贡献率(52.67%)显著高于气候变化的相对贡献率(47.33%)。

3 讨 论

3.1 毛乌素沙地NDVI时空变化趋势

NDVI能够很好地表征植被的覆盖和生长状况,被广泛用作植被地上生产力的替代指标[31]。1998—2019年毛乌素沙地NDVI变化整体上呈增加趋势,且以0.0067·a^{-1}的速率增长。空间格局上呈现东南高、西北低的空间分布格局,这与王旭洋等[33]的研究结论一致。高值区(NDVI>0.40)集中连续分布于毛乌素沙地东南部,与毛乌素沙地的降水格局具有显著的一致性[34]。究其原因,主要是该区域是北方防沙治沙、退耕还林和天然林保护工程的重点实施区域[35],有效抑制了毛乌素沙地南扩的势头[36]。低值区分布在毛乌素沙地的中部和西北部。时间序列上则表现为显著线性增加趋势但存在年际波动。波动原因可能与区域生态工程实施类别、年份差异和气候波动有关。持续性分析结果表明,毛乌素沙地NDVI未来演变趋势整体表现出较弱的反持续性,存在因气候持续干旱引发的潜在退化风险。通过对NDVI的未来变化、空间分布差异及时间变化特征分析,可为开展重大生态恢复评估和未来植被保护政策制定提供理论依据,并以此来判断新生态保护政策的合理性。

3.2 毛乌素沙地NDVI动态变化驱动机制分析

气候和人类活动是控制和影响植被空间分布及其变化的基本驱动力[37]。本研究中,气候变化驱动了面积占比为93.12%的NDVI的增加。其中,降水量对NDVI空间分布的解释力较高,驱动了毛乌素沙地73.14%的NDVI的增加。逐年NDVI与降水量的相关性分析结果表明,NDVI的年际波动与降水波动基本一致,说明植被对降水的年际变化更敏

感,这和周伟等[38]的关于温性荒漠草原NPP与降水量的相关性最显著的论断一致。而NDVI的年际波动与气温的波动基本呈负相关关系,主要是由于升温导致干旱程度加剧,抑制了植被生长[39],乃至于局部人工植被因土壤干层出现而出现枯败和死亡现象。在气候变暖背景下,干旱频率、持续时间、强度和影响范围上都表现出显著增加的趋势[40],但干旱事件的发生并未改变毛乌素沙地NDVI整体性的增加趋势[34],这可能归因于毛乌素沙地自1999年来实施的退耕还林还草等生态修复工程[41]。

由像元尺度分析可知,因人类活动对NDVI变化产生促进作用的面积占比为83.20%。其中,毛乌素沙地东南部NDVI受降水和人类活动的耦合作用影响,NDVI得以显著改善,土地沙化现象得以控制。随着一系列大型生态工程的实施及禁牧封育政策的落实[38],人类活动对毛乌素沙地NDVI的负面影响逐渐减弱。局地区域如位于鄂托克旗西部的棋盘井矿区[42],此地因煤炭矿产资源富集,NDVI变化主要受人类活动的影响,长期和快速扩张的矿业活动使土地压损、地貌景观破坏等问题严重,导致植被稳定性较弱,且存在土地沙化和水土流失等问题[38]。需进一步加强人类活动管控,协调好经济发展与环境保护的关系。

3.3 气候变化与人类活动的相对贡献率

气候变化是植被生长的关键控制要素,但是一系列生态恢复工程的实施也对植被的快速恢复起到重要作用。鉴于气候要素和人类活动的空间异质性,使得二者对NDVI影响的贡献率存在显著的空间分异。具体表现为:气候变化主导了毛乌素沙地94.38%的植被改善,人类活动则主导了88.09%的植被改善区的NDVI增加,而气候要素与人类活动共同主导了86.30%的植被改善。但不同植被类型对气候变化的响应程度存在空间分异,呈显著改善趋势的区域主要分布在降水条件更好的东南部,而非降水更少的荒漠区域。这与张强等[41]对中国西北植被变化的归因分析结果一致。其中,一些积极的人类活动如耕地转为林地、节水灌溉、围栏放牧、禁牧、退耕还林等,尤其是大型指针式喷灌作业[43-44]在农林牧业中的应用,不仅有效地缓解了区域植被恢复水资源约束问题,还能促进大范围NDVI的提升;同时一些负面的人类活动如城市扩张、矿产资源开采、偷牧等则是毛乌素沙地局地NDVI减小的主要原因。总体而言,在气候变化和人类活动共同作用下,毛乌素沙地NDVI在1998—2019年得到了极大的改善。

4 结 论

(1) 1998—2019年毛乌素沙地NDVI呈波动增加趋势,年均增长率为0.0067·a^{-1},且表现为植被改善面积(95.25%)远大于植被退化面积(4.25%)。空间分布上表现为由西北向东南逐渐递增趋势。

(2) 气候变化与人类活动的耦合作用共同驱动了毛乌素沙地NDVI的增长。其中,降水量对NDVI的影响比气温更为显著。人类活动与气候要素的耦合驱动了毛乌素沙地86.30%的植被改善,与已有生态建设工程成效研究结论相符。而一些人类的负面活动则驱动了局地的植被退化,但趋势有所减缓。

(3) 气候变化与人类活动的耦合作用对毛乌素沙地NDVI的影响更为显著。人类活动促进了毛乌素沙地83.20%的NDVI增长,气候要素中降水量对NDVI空间分布的解释力较高,驱动了毛乌素沙地73.14%的NDVI增长。

参考文献(References)

[1] 史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961—2010年)[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2294-2306. [Shi Peijun, Sun Shao, Wang Ming, et al. Climate change regionalization in China (1961—2010)[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(10): 2294-2306.]

[2] 原媛, 母艳梅, 邓钰洁, 等. 植被覆盖度和物候变化对典型黑沙蒿灌丛生态系统总初级生产力的影响[J]. 植物生态学报, 2022, 46(2): 162-175. [Yuan Yuan, Mu Yanmei, Deng Yujie, et al. Effects of land cover and phenology changes on the gross primary productivity in an *Artemisia ordosica* shrubland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(2): 162-175.]

[3] 贾根锁. IPCC《气候变化与土地特别报告》对陆气相互作用的新认知[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 9-16. [Jia Gensuo. New understanding of land-climate interactions from IPCC "special report on climate change and land"[J]. Climate Change Research, 2020, 16(1): 9-16.]

[4] 张清雨, 赵东升, 吴绍洪, 等. 基于生态分区的内蒙古地区植被覆盖变化及其影响因素研究[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 594-601. [Zhang Qingyu, Zhao Dongsheng, Wu Shaohong, et al. Research on vegetation changes and influence factors based on eco-geographical regions of Inner Mongolia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 594-601.]

[5] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes[J]. Global and Planetary Change, 2013, 101: 119-128.

[6] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3): 241-252.

[7] Davies K P, Murphy R J, Bruce E. Detecting historical changes to vegetation in a Cambodian protected area using the Landsat TM and ETM+ sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 187: 332-344.

[8] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.

[9] Guli J, Liang S L, Yi Q X, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015, 58: 64-76.

[10] Piao S L, Wang X H, Park T J, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(1): 14-27.

[11] Sun Z Y, Wang X F, Yamamoto H, et al. Spatial pattern of GPP variations in terrestrial ecosystems and its drivers: Climatic factors, CO_2 concentration and land-cover change, 1982—2015[J]. Ecological Informatics, 2018, 46: 156-165.

[12] Lin M, Hou L Z, Qi Z M, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation NDVI in China's Mu Us Sandy Land during 2000—2019[J] Ecological Indicators, 2022, 142: 109164, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109164.

[13] 张红丽, 韩富强, 张良, 等. 西北地区气候暖湿化空间与季节差异分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 517-531. [Zhang Hongli, Han Fuqiang, Zhang Liang, et al. Analysis of spatial and seasonal variations in climate warming and humidification in northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 517-531.]

[14] Wang X, Song J L, Xiao Z Q, et al. Desertification in the Mu Us Sandy Land in China: Response to climate change and human activity from 2000 to 2020[J]. Geography and Sustainability, 2022, 3 (2): 177-189.

[15] Ji X Y, Yang J Z, Liu J Y, et al. Analysis of spatial-temporal changes and driving forces of desertification in the Mu Us Sandy Land from 1991 to 2021[J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10399, doi: 10.3390/su151310399.

[16] Cai H Y, Yang X H, Xu X L. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: The effects of ecological protection and restoration projects[J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 112-119.

[17] 徐勇, 黄雯婷, 郭振东, 等. 2000—2020年我国西南地区植被NEP时空变化及其驱动因素的相对贡献[J]. 环境科学研究, 2023, 36(3): 557-570. [Xu Yong, Huang Wenting, Guo Zhendong, et al. Spatio-temporal variation of vegetation net ecosystem productivity and relative contribution of driving forces in southwest China from 2000 to 2020[J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(3): 557-570.]

[18] Zhou D J, Zhao X, Hu H F, et al. Long-term vegetation changes in the four mega-sandy lands in Inner Mongolia, China[J]. Landscape Ecology, 2015, 30(9): 1613-1626.

[19] 杨梅焕, 靳小燕, 王涛. 毛乌素沙地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 242-249. [Yang Meihuan, Jin Xiaoyan, Wang Tao. Vegetation phenology change of Mu Us Sandy Land and its response to climate change[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 242-249.]

[20] Han X Y, Jia G P, Yang G, et al. Spatiotemporal dynamic evolution and driving factors of desertification in the Mu Us Sandy Land in 30 years[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21734, doi: 10.1038/s41598-020-78665-9.

[21] Feng K, Wang T, Liu S L, et al. Path analysis model to identify and analyse the causes of aeolian desertification in Mu Us Sandy Land, China[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107386, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107386.

[22] 陆晴, 吴绍洪, 赵东升. 1982—2013年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系[J]. 地理科学, 2017, 37(2): 292-300. [Lu Qing, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng. Variations in alpine grassland cover and its correlation with climate variables on the Qinghai-Tibet Plateau in 1982—2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(2): 292-300.]

[23] 刘玉红, 张筠, 张春华, 等. 2000—2015年山东省植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1464-1471. [Liu Yuhong, Zhang Jun, Zhang Chunhua, et al. Spatial and temporal variations of vegetation net primary productivity and its responses to climate change in Shandong Province from 2000 to 2015[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38 (5): 1464-1471.]

[24] 李舒婷, 周艺, 王世新, 等. 2001—2015年内蒙古NDVI时空变化及其对降水和气温的响应[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(1): 48-55. [Li Shuting, Zhou Yi, Wang Shixin, et al. Spatial-temporal variation of NDVI and its responses to precipitation and temperature in Inner Mongolia from 2001 to 2015[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(1): 48-55.]

[25] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874. [Gao Haidong, Pang Guowei, Li Zhanbin, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 863-874.]

[26] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 等. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3557-3568. [Geng Qingling, Chen Xiaoqing, He Xiaohui, et al. Vegetation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegetation types in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3557-3568.]

[27] 尹振良, 冯起, 王凌阁, 等. 2000—2019年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 11-21. [Yin

Zhenliang, Feng Qi, Wang Lingge, et al. Vegetation coverage change and its influencing factors across the northwest region of China during 2000—2019[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(4): 11-21.]

[28] 于璐, 武志涛, 杜自强, 等. 气候变化背景下京津风沙源区人类活动对植被影响的量化分析[J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 2007-2014. [Yu Lu, Wu Zhitao, Du Ziqiang, et al. Quantitative analysis of the effects of human activities on vegetation in Beijing-Tianjin sandstorm source region under the climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 2007-2014.]

[29] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974. [Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961-974.]

[30] 程兀杰, 孟妮娜, 蔡昕楠, 等. 陕西省NDVI时空变化及其对气候和人类活动的响应[J]. 人民黄河, 2023, 45(4): 28-34. [Cheng Wujie, Meng Nina, Cai Xinnan, et al. Temporal and spatial variation of NDVI in Shaanxi Province and its response to climate change and human activities[J]. Yellow River, 2023, 45(4): 28-34.]

[31] Brinkmann K, Dickhoefer U, Schlecht E, et al. Quantification of aboveground rangeland productivity and anthropogenic degradation on the Arabian Peninsula using Landsat imagery and field inventory data[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 465-474.

[32] 赵媛媛, 丁国栋, 高广磊, 等. 毛乌素沙区沙漠化土地防治区划[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 635-643. [Zhao Yuanyuan, Ding Guodong, Gao Guanglei, et al. Regionalization for aeolian desertification control in the Mu Us Sandy Land region, China[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4): 635-643.]

[33] 王旭洋, 李玉霖, 连杰, 等. 半干旱典型风沙区植被覆盖度演变与气候变化的关系及其对生态建设的意义[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 183-194. [Wang Xuyang, Li Yulin, Lian Jie, et al. Relationship between vegetation coverage and climate change in semiarid sandy land and the significance to ecological construction [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 183-194.]

[34] 张云芝. 2000—2019年毛乌素沙地-黄土过渡带土地绿度与水热变化及其作用机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. [Zhang Yunzhi. Study on evolvement of moisture-heat and the response of land greenness in transition zone between Mu Us Sandy Land and Loess Plateau from 2000 to 2019[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.]

[35] 高国雄. 毛乌素沙地东南缘人工植被结构与生态功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007. [Gao Guoxiong. Study on structure and ecological function of artificial vegetation in southeast margin of Maowusu Sand Land[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.]

[36] 李登科, 范建忠, 王娟. 陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2896-2903. [Li Dengke, Fan Jianzhong, Wang Juan. Change characteristics and their causes of fractional vegetation coverage (FVC) in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2896-2903.]

[37] 殷崎栋, 柳彩霞, 田野. 基于MODIS NDVI数据的陕西省植被绿度时空变化及人类活动影响[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1571-1582. [Yin Qidong, Liu Caixia, Tian Ye. Spatio-temporal greenness and anthropogenic analysis in Shaanxi based on MODIS NDVI from 2001 to 2018[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1571-1582.]

[38] 周伟, 牟凤云, 刚成诚, 等. 1982—2010年中国草地净初级生产力时空动态及其与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2017, 37(13): 4335-4345. [Zhou Wei, Mou Fengyun, Gang Chengcheng, et al. Spatio-temporal dynamics of grassland net primary productivity and their relationship with climatic factors from 1982 to 2010 in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4335-4345.]

[39] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 534-543. [Gao Jiangbo, Jiao Kewei, Wu Shaohong. Revealing the climatic impacts on spatial heterogeneity of NDVI in China during 1982—2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 534-543.]

[40] Liu Y, Li Y, Li S, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: Correlations with climate and human factors[J]. Remote Sensing, 2015, 7(10): 13233-13250.

[41] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68(14): 1814-1828. [Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(14): 1814-1828.]

[42] 郑颖娟, 刘军会, 刘洋, 等. 2000—2018年鄂尔多斯市植被覆盖度变化及驱动因素分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(11): 2458-2468. [Zheng Yingjuan, Liu Junhui, Liu Yang, et al. Analysis of vegetation coverage change and driving factors in Ordos City from 2000 to 2018[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(11): 2458-2468.]

[43] 张梦珈, 王晓荣. 浅谈陕北毛乌素沙地大规模喷灌农田防护林体系的建设[J]. 榆林学院学报, 2022, 32(6): 57-61. [Zhang Mengjia, Wang Xiaorong. Construction of a large-scale farmland and shelter forest sprinkler system in the Mu Us Land in northern Shaanxi[J]. Journal of Yulin University, 2022, 32(6): 57-61.]

[44] 陈占飞. 毛乌素沙漠南缘马铃薯规模化种植对生态环境的影响[J]. 中国农业信息, 2016(5): 126-127. [Chen Zhanfei. Influence of potato large-scale cultivation on ecological environment in the southern margin of the Mu Us Land[J]. China Agricultural Information, 2016(5): 126-127.]

Quantitative analysis of NDVI changes in Mu Us Sandy Land by climate change and human activities

CHANG Wenjing[1], CONG Shixiang[1], WANG Rongrong[1],
DING Xudong[1], YU Hailong[1], HUANG Juying[2]
(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;
2. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Climate change and human activities are the primary factors influencing vegetation dynamics. The normalized difference vegetation index (NDVI) serves as an effective indicator for assessing vegetation changes, enabling evaluation of ecosystem dynamics and sustainability. Using SPOT/VEGETATION NDVI time series data, meteorological data, and land cover data, this study investigates the spatiotemporal evolution characteristics and driving mechanisms of NDVI in the Mu Us Sandy Land, China, from 1998 to 2019. Employing GIS spatial analysis, correlation analysis, and residual analysis, the study quantifies the relative contributions of climate change and human activities to NDVI variations. The findings reveal the following: (1) From 1998 to 2019, interannual NDVI in the Mu Us Sandy Land exhibited a significant upward trend, with a growth rate of $0.0067 \cdot a^{-1}$. Spatially, NDVI displayed a gradual increase from northwest to southeast. However, the overall sustainability of NDVI growth was weak, indicating potential future fluctuations. (2) Both climate change and human activities jointly contributed to NDVI growth. NDVI changes were significantly positively correlated with precipitation, while correlations with temperature were weaker. Large-scale ecological projects and the interplay of climatic factors accounted for 86.30% of the observed vegetation improvement, aligning with existing studies on the impact of ecological projects. (3) Attribution analysis demonstrated that human activities contributed to 83.20% of NDVI growth, while precipitation accounted for 73.14%. The coupling effect of precipitation and human activities had a more pronounced influence on NDVI.

Key words: Mu Us Sandy Land; vegetation NDVI; climatic change; human activities; relative contribution rate